

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měření na synchronním stroji za klidu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MÁLEK**  
Osobní číslo: **E12B0277P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika**  
Název tématu: **Měření na synchronním stroji za klidu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište princip měření při použití metody určení parametrů synchronního stroje ze zkoušky za klidu stroje.
2. Specifikujte požadavky na měřící zařízení a vybavení.
3. Proveďte měření na synchronním stroji v klidu, nutná pro určení jeho parametrů.
4. Shrňte získané zkušenosti.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. IEEE Std. 155-2009.
2. ČSN EN 60034-4 ed.2.
3. Canay, I. M., Determination of Model Parameters of Machines from the Reactance Operators  $x_d(js)$ ,  $x_q(js)$  and Modeling of Alternating-Current Machines Having Multiple Rotor Circuits, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-8, no. 2, pp. 272279 and pp. 280296, June 1993.
4. Jef Verbeeck: Standstill Frequency Response Measurement and Identification Methods for Synchronous Machine. Vrije Universiteit Brussel, 2000, pp.238.
5. Internet.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření parametrů synchronního stroje za klidu.

## **Klíčová slova**

Synchronní stroj, měření synchronního stroje, off-line měření.

## **Abstract**

The present work is aimed at measuring the parameters of the synchronous machine is at rest.

## **Key words**

Synchronous machine, measurement of synchronous machine, off-line measurement.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1.6.2015

Martin Málek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 SYNCHRONNÍ STROJ .....</b>	<b>11</b>
1.1 OBEČNĚ .....	11
1.2 KONSTRUKCE .....	11
1.2.1 Stator .....	11
1.2.2 Rotor .....	11
1.2.3 Chlazení .....	11
1.3 PRINCIP ČINNOSTI .....	12
<b>2 PRINCIP METODY .....</b>	<b>13</b>
2.1 OBEČNĚ .....	13
2.2 VÝHODY METODY .....	13
2.3 ZAPOJENÍ STROJE .....	14
2.4 MĚŘENÉ VELIČINY A NĚKTERÉ VZTAHY .....	14
<b>3 POŽADAVKY NA STROJ .....</b>	<b>16</b>
3.1 OBEČNĚ .....	16
3.2 TEPLOTA STROJE .....	16
3.3 NASTAVENÍ ROTORU DO PODÉLNÉ A PŘÍČNÉ POLOHY .....	16
<b>4 POŽADAVKY NA MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>18</b>
4.1 ANALÝZA SIGNÁLU .....	18
4.2 MĚŘENÍ NAPĚTÍ A PROUDU .....	18
4.3 GENERÁTOR .....	18
4.4 ZESILOVAČ .....	18
4.5 PŘESNOST MĚŘENÍ .....	18
<b>5 POSTUP MĚŘENÍ .....</b>	<b>19</b>
5.1 PŘÍPRAVA STROJE .....	19
5.2 ZAPOJENÍ STROJE .....	19
5.3 MĚŘENÍ V PŘÍČNÉ POLOZE .....	20
5.4 MĚŘENÍ V PODÉLNÉ POLOZE .....	20
5.5 TABULKY .....	22
5.6 GRAFY .....	24
5.7 POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	30
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>33</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>35</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$L_d$ .....	Podélná operátorová indukčnost
$L_q$ .....	Příčná operátorová indukčnost
$G$ .....	Přenosová funkce toku statoru a buzení
$sG$ .....	Přenosová funkce statorového proudu a buzení
$Z_{afo}$ .....	Poměr Laplaceovy transformace budícího napětí a proudu $i_d$
$Z_d$ .....	Operátorová podélná impedance
$Z_q$ .....	Operátorová příčná impedance
$u_q$ .....	Napětí statoru v příčné poloze
$i_q$ .....	Proud statoru v příčné poloze
$u_d$ .....	Napětí statoru v podélné poloze
$i_d$ .....	Proud statoru v podélné poloze
$u_{fd}$ .....	Napětí rotoru naprázdno
$i_{fd}$ .....	Proud rotoru nakrátko
$R_a$ .....	Kotevní odpor jedné fáze
FFT.....	Rychlá Forierova tranformace
RMS.....	Efektivní hodnota střídavého napětí
$d$ .....	Podélná poloha
$q$ .....	Příčná poloha
$\varphi_a$ .....	Fázový posuv napětí a proudu statoru
$\varphi_u$ .....	Fázový posuv napětí statoru a rotoru
$\varphi_i$ .....	Fázový posuv proudu statoru a rotoru
$s$ .....	Komplexní úhlový kmitočet
MATLAB.....	Matrix laboratory

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na měření parametrů synchronního stroje za klidu.

Text je rozdělen do pěti částí; první se zabývá obecným popisem synchronního stroje; druhá principem metody a měření, třetí specifikuje požadavky na synchronní stroj; čtvrtá část specifikuje požadavky na měřicí zařízení a vybavení pro měření. Poslední část popisuje měření a shrnuje získané zkušenosti.

# 1 Synchronní stroj

## 1.1 Obecně

Jedná se o točivý stroj, využívající princip elektromagnetické indukce. Synchronní stroje jsou využívány pro výrobu elektrické energie a můžeme rozdělit do dvou kategorií, na turboalternátory a hydroalternátory. Turboalternátory jsou nejčastěji poháněny parními, nebo plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 otáček za minutu. Hydroalternátory jsou poháněny vodními turbínami a dosahují podstatně nižších otáček oproti turboalternátorům. Synchronní stroje mohou být využity také jako synchronní kompenzátory pro zlepšení účinníku v elektrické síti. Synchronní motory jsou využívány v oblasti průmyslové automatizace a robotiky, od malých výkonů do výkonů řádově megawattů.

## 1.2 Konstrukce

### 1.2.1 Stator

Statorové vinutí se neliší od vinutí použitého v asynchronním stroji. Obsahuje tři fázové vinutí, které je umístěno v držákách a je napájeno střídavým proudem.

### 1.2.2 Rotor

Na rotoru je umístěno budící vinutí napájené pomocí sběracích kroužků a kartáčů, nebo pomocí rotačního usměrňovače. Vinutí je napájeno stejnosměrným proudem. Podle provedení rotoru rozlišujeme na dva základní typy synchronních strojů, a to na stroje s vyniklými póly a na stroje s hladkým rotorem. Stroje s hladkým rotorem jsou určeny pro vyšší otáčky. Na rotoru synchronního stroje mohou být místo budícího vinutí umístěny permanentní magnety.

### 1.2.3 Chlazení

Stroje malých výkonů jsou chlazeny přirozeně proudícím vzuchem. Od vyšších výkonů mají stroje vlastní ventilátor, který zajistí dostatečné proudění vzduchu k ochlazení stroje. Stroje s vysokým výkonem jsou chlazeny pomocí vody, vodíku, nebo jejich kombinace.

### 1.3 Princip činnosti

Po připojení tří fázové sítě na svorky statoru vzniká uvnitř stroje točivé magnetické pole. Rychlost otáčení magnetického pole je dána frekvencí napájení a počtem pólů motoru. Budící vinutí na rotoru je napájeno přes kartáče stejnosměrným proudem a vzniká stacionární magnetické pole. Vzájemným působením statorového a rotorového magnetického pole vzniká točivý moment. Rotor se otáčí stejnou rychlostí, jako točivé pole statoru. Synchronní stroj se sám neroztočí a musí být teda roztočen jiným způsobem. Stroj může být roztočen pomocí asynchronního rozběhu, přídavného asynchronního motoru, nebo pomocí frekvenčního měniče.

## 2 Princip metody

Metoda slouží ke stanovení reaktancí dynamického modelu synchronního stroje. Důvodem pro použití této metody je mechanické namáhání konstrukce motoru, které vzniká při použití metody náhlým zkratem. [1]

### 2.1 Obecně

Metoda je off-line metoda pro stanovení parametrů. Vzhledem ke zkoušce náhlým zkratem se jedná o nerizikovou zkoušku. Pokud mají změřené parametry být použity do dynamického modelu stroje, musí mít i budící signál velký kmitočtový rozsah. [1]

Budící signál je přiveden na dvě sériově spojené statorové fáze vinutí, aby se neuplatnila netočivá reaktance. Z důvodu měřitelnosti signálu musí být při měření na velkých strojích budící signál dostatečně zesílen. Jako budící signál se používá sinusová vlna vhodného napětí a proměnného kmitočtu. Kmitočet se pohybuje v rozsahu  $0,01\text{Hz} - 1\text{kHz}$ , proud až 40A. Zkouška se provádí vzhledem k jmenovitým parametrům stroje malým proudem a napětím. [1]

### 2.2 Výhody metody

Metoda je cenově nenáročná a je proveditelná u výrobce, na zkušebně nebo na zabudovaném stroji. Měření je možné při minimálních změnách v sestavě stroje oproti zkoušce náhlým zkratem. Vzhledem ke stavu nakrátko (statický stav) lze touto metodou stanovit odezvu budícího vinutí. Největší předností je bezpečnost zkoušky. Vzhledem ke jmenovitým parametrům stroje je prováděna malým napětím a proudem. Ve stroji je proto nepatrný magnetický tok. Touto zkouškou lze nahradit, nebo doplnit „Zkouška náhlým zkratem“, která je normalizovaná IEC. [1]

### 2.3 Zapojení stroje

Stroj musí být vypnut a odpojen od sítě. Je možné použít více metod zapojení statoru, ale nejčastěji se používá zapojení s rotorem nakrátko v podélné poloze. Pomocí tohoto zapojení lze určit indukčnost  $L_d(s)$  a přenosovou funkci stator – rotor  $G(s)$ . Jako doplněk lze provést měření s rotorem naprázdno. Pro určení parametru  $L_q(s)$  se použije stejný postup, ale rotor je v příčné poloze ( $+90^\circ$  elektrických). [1]

### 2.4 Měřené veličiny a některé vztahy

Veličiny a funkce s proměnnou „s“ jsou komplexní veličiny. Veličina „s“ je komplexní úhlový kmitočet, definovaný jako [1]

$$s = j\omega = j2\pi f \text{ [rad / s]} \quad (2.1.1)$$

$L_d(s)$  - podélná operátorová indukčnost, Laplaceova transformace poměru podélného spřaženého toku a proudu  $i_d$ , budící vinutí zkratované [1]

$L_q(s)$  - příčná operátorová indukčnost, Laplaceova transformace poměru příčného spřaženého toku a proudu  $i_q$ , budící vinutí naprázdno [1]

$G(s)$  - přenosová funkce toku statoru a buzení, Laplaceova transformace poměru spřaženého toku podélného a budícího napětí, budící vinutí naprázdno [1]

$$G(s) = \frac{\Delta u_d(s)}{s \cdot \Delta u_{fd}(s)} \quad (2.1.2)$$

$sG(s)$  - přenosová funkce statorového proudu a buzení, budící vinutí nakrátko. Může být měřeno současně se  $Z_d(s)$  [1]

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \quad (2.1.3)$$

$Z_{af0}(s)$  - poměr Laplaceovy transformace budícího napětí a proudu  $i_d$ , budící vinutí naprázdno [1]

$$Z_{af0}(s) = \frac{\Delta u_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \quad (2.1.4)$$

$Z_d(s)$  - operátorová podélná impedance  $Z_d(s) = R_a + sL_d(s)$ ,  $R_a$  je kotevní odpor jedné fáze (DC hodnota), budící vinutí nakrátko [1]

$$Z_d(s) = -\frac{\Delta u_d(s)}{\Delta i_d(s)} [\Omega] \quad (2.1.5)$$

$Z_q(s)$  - operátorová příčná impedance  $Z_q(s) = R_a + sL_q(s)$ ,  $R_a$  je kotevní odpor jedné fáze (DC hodnota), budící vinutí nakrátko. [1]

$$Z_q(s) = -\frac{\Delta u_q(s)}{\Delta i_q(s)} [\Omega] \quad (2.1.6)$$

## 3 Požadavky na stroj

### 3.1 Obecně

Během měření musí být stroj zastaven. Rotor musí být mechanicky uvolněn, z důvodu jeho natáčení do příčné a podélné polohy při měření. Vinutí motoru je odpojeno, a to statorové i rotorové. Je možné vyjmout kartáče. V případě rotačního usměrňovače je nutno odpojit vývod budicího vinutí od diodového můstku. [1]

### 3.2 Teplota stroje

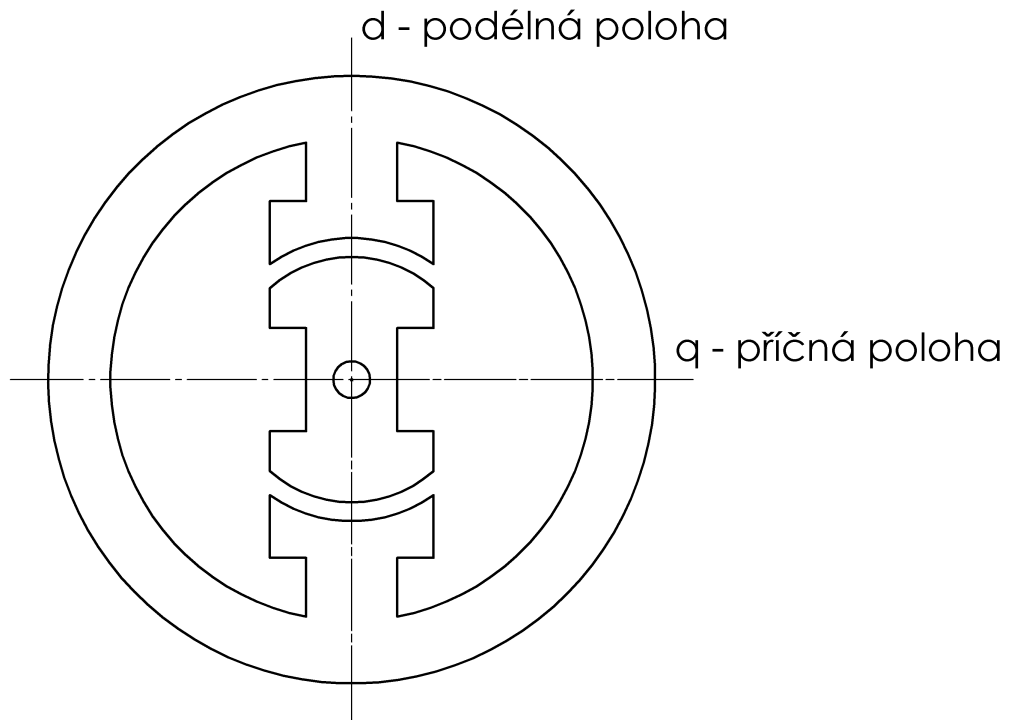
Je důležité, aby byla teplota uvnitř stroje udržována na konstantní hodnotě. Výsledky měření jsou citlivé na odpor kotvy stroje. Stroj by měl být chlazen na teplotu, která se co nejvíce blíží teplotě okolního prostředí. Výměníky tepla na statoru musí být vypnuty. Cirkulace vody přes statorové vinutí by měla zůstat zachována, aby bylo zajištěno, že stagnace nezpůsobuje změnu vodivosti vody. [1]

### 3.3 Nastavení rotoru do podélné a příčné polohy

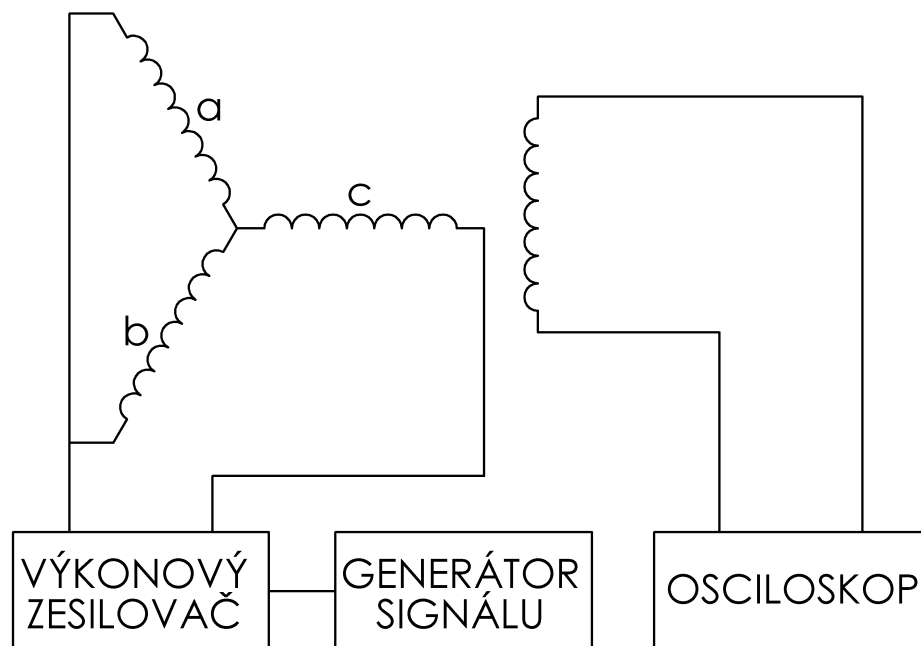
Rotoru stroje musí být umožněno otáčení a nesmí být ovlivněn soustrojím, na kterém může být připojen. Rotor musí být velice přesně mechanicky natočen do podélné, nebo příčné polohy viz obr. 3.3.1. V případě mnohopólového stroje je přesné natočení velmi důležité, protože každý stupeň odchýlení rotoru od příčné nebo podélné polohy se násobí počtem pólů. Pro turbo generátory není odchylka od natočení tolik významná. [1]

Vinutí stroje bude zapojené dle schématu na obr. 3.3.2. Stator je napájen ze zesilovače sinusovou vlnou o kmitočtu 100 Hz. Osciloskopem je sledováno napětí indukované do buzení. Rotorem se musí pomalu otáčet. V okamžiku, kdy je napětí v rotoru minimální, je dosaženo podélné polohy s fází *a* a *b*. Tyto fáze napájíme pro určení podélných parametrů. Příčná poloha je nastavena v okamžiku, kdy je napětí v rotoru maximální. [1]





Obr. 3.3.1 Příčná a podélná poloha



Obr. 3.3.2 Schéma zapojení motoru pro určení příčné a podélné polohy [1]

## 4 Požadavky na měřicí zařízení

### 4.1 Analýza signálu

Měřené signály lze analyzovat spektrálním analyzátozem, který lze nahradit osciloskopem a následným výpočtem základní harmonické pomocí FFT. Oba přístroje musí umožňovat měření amplitudy a fázového posunu dvou, případně tří signálů. Měřicí rozsah je od  $0,001\text{Hz}$  do  $1\text{kHz}$  a rozlišení fázového posuvu  $0,1$  stupně. Měřicí přístroj musí být vybaven diferenciálními vstupy do  $100\text{V RMS}$ . Při použití softwarového zpracování dat se velmi urychlí jejich vyhodnocení, které by jinak bylo velmi časově náročné. [1]

### 4.2 Měření napětí a proudu

Pro měření proudu je možné použít bočník a napěťovou sondu nebo proudovou sondu. Musí umožňovat měření od  $\text{mA}$  až po desítky ampér. Pro měření napětí je možné použít přímo sondu osciloskopu. Kmitočtový rozsah sond je od  $0,001\text{Hz}$  po  $1\text{kHz}$ . [1]

### 4.3 Generátor

Sloužící ke generování sinusového signálu pro výkonový zesilovač. Kmitočet výstupního signálu se pohybuje od  $0,001\text{Hz}$  po  $1\text{kHz}$ . [1]

### 4.4 Zesilovač

Slouží k dostatečnému zesílení signálu z generátoru pro napájení vinutí. Pro stroj o výkonu  $500\text{-}900\text{MW}$  je potřeba zhruba  $40\text{A}$  a  $15\text{V RMS}$ . [1]

### 4.5 Přesnost měření

Pro všechny použité kmitočty by měla být přesnost měření do  $1\%$ . Přechodové jevy na svorkách a spojích je nutno minimalizovat, zejména na kotvě. Při použití bočníku je nejlepší připojit jej jedním koncem na svorku stroje. Pro zlepšení spojů je doporučeno použít kontaktní vazelínu. [1]

## 5 Postup měření

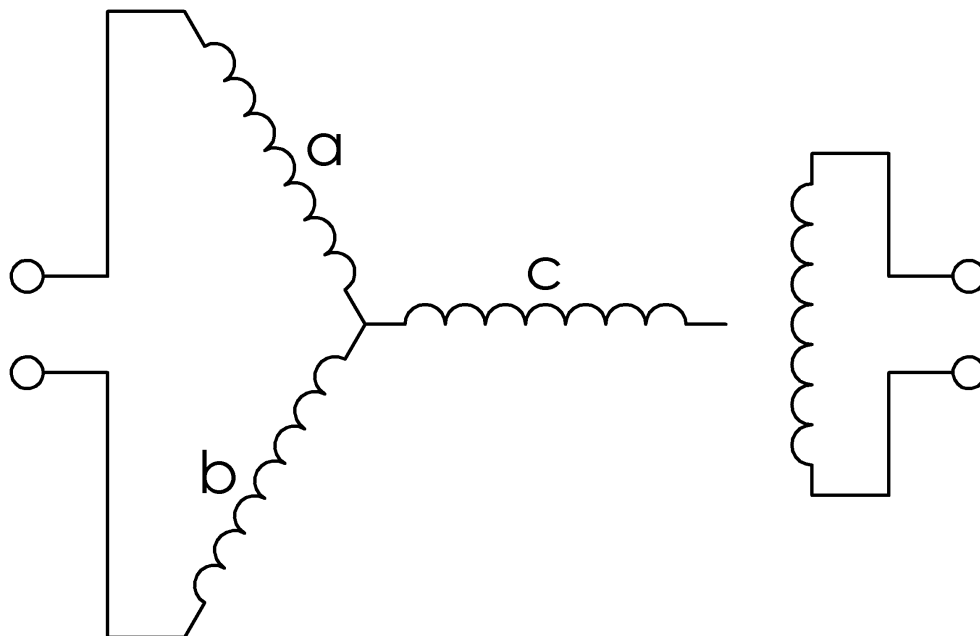
### 5.1 Příprava stroje

Během přípravy na měření byl stroj uveden do klidu. Soustrojí stroje neovlivňovalo měření, umožňovalo otáčení rotorem stroje, a proto nebylo odpojeno.

### 5.2 Zapojení stroje

Vinutí synchronního stroje byla připojena na svorky dle obr. 5.2.1. Statorové vinutí synchronního stroje bylo propojeno s laboratorním pultem, kde bylo připojeno k výkonovému zesilovači. Na propojení mezi výkonovým zesilovačem a laboratorním pultem byla připojena sonda pro měření napětí a proudu. Obě sondy byly připojeny na vstupy osciloskopu. Výkonový zesilovač byl propojen s generátorem signálu.

Na rotorové vinutí byla připojena napěťová, později proudová sonda osciloskopu.



Obr. 5.2.1 Zapojení vinutí stroje pro měření

### 5.3 Měření v příčné poloze

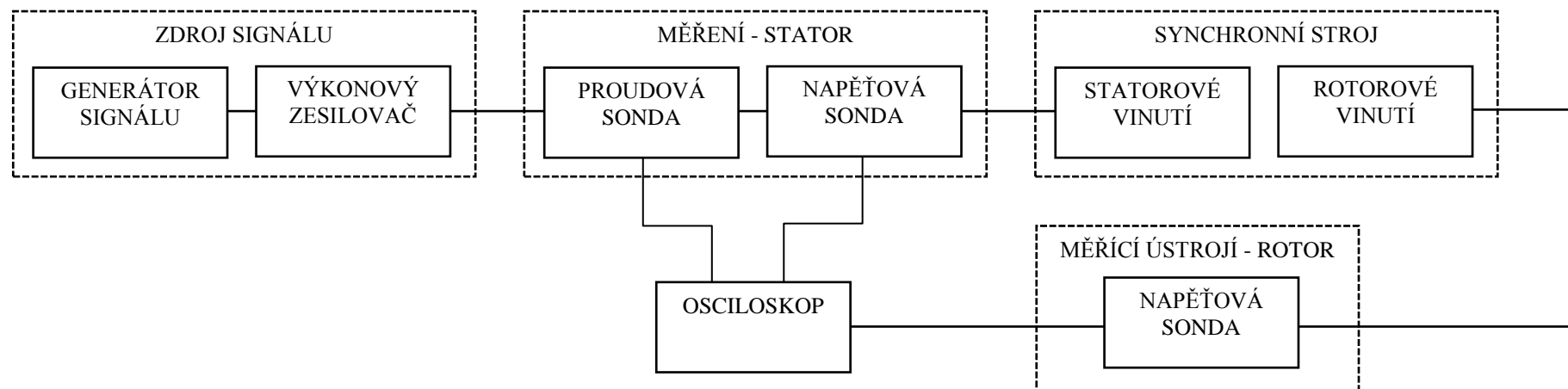
Příčná poloha je nastavena podle odstavce 3.3 sinusovou vlnou o frekvenci 100Hz. Rotorem bylo otáčeno, aby bylo dosaženo co nejvyššího indukovaného napětí do rotoru.

Měření bylo provedeno v rozsahu frekvencí, které umožňoval generátor signálu. Frekvence byly nastavovány v rozsahu od 10Hz do 200Hz. Pro každou frekvenci byly pomocí osciloskopu změřeny hodnoty  $u_q$ ,  $i_q$ ,  $\varphi_a$ . Měření byla provedena pro několik úrovní signálu dle stupnice výkonového zesilovače. Pro vyšší zesílení musely být po posledním měření na frekvenci 200Hz znovu změřeny parametry na frekvenci 10Hz z důvodu oteplení stroje.

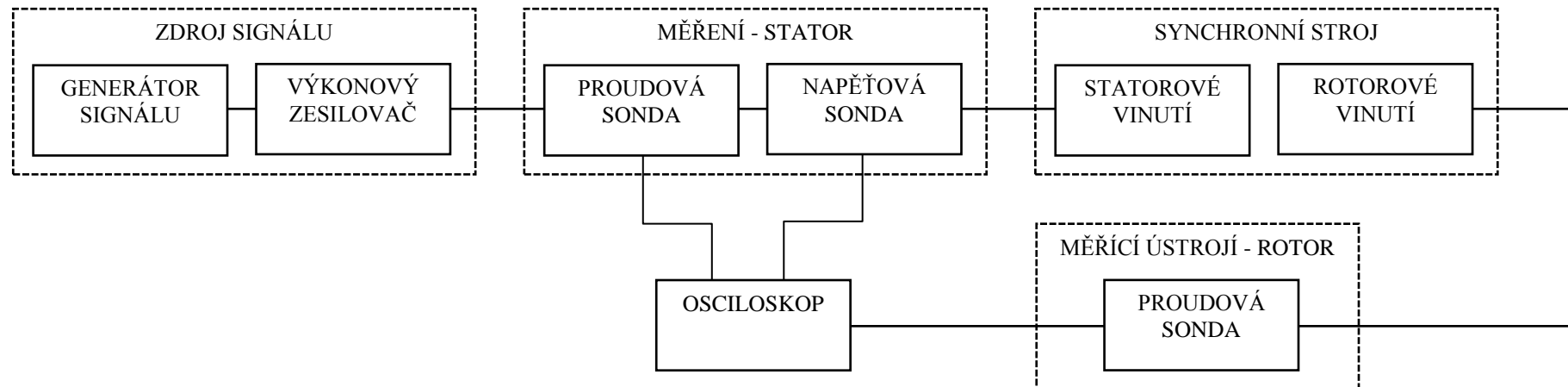
### 5.4 Měření v podélné poloze

Podélná poloha je nastavena podle odstavce 3.3 sinusovou vlnou o frekvenci 100Hz. Rotorem bylo otáčeno, aby bylo dosaženo co nejnižšího indukovaného napětí do rotoru. Měření bylo provedeno nakrátko a naprázdno. Stroj byl zapojen dle blokových schémat obr. 5.4.1 a 5.4.2.

Měření bylo provedeno v rozsahu frekvencí, které umožňoval generátor signálu. Frekvence byly nastavovány v rozsahu od 10Hz do 200Hz. Pro každou frekvenci byly pomocí osciloskopu změřeny hodnoty  $u_d$ ,  $i_d$ ,  $\varphi_a$  pro statorové vinutí a  $u_{fd}$ ,  $i_{fd}$ ,  $\varphi_u$ ,  $\varphi_i$  pro rotorové vinutí. Měření byla provedena vyšší úroveň signálu dle stupnice výkonového zesilovače. Po posledním měření na frekvenci 200Hz musely být znovu změřeny parametry na frekvenci 10Hz z důvodu oteplení stroje.



Obr. 5.4.1 Blokové schéma pro měření v podélné poloze naprázdno



Obr. 5.4.2 Blokové schéma pro měření v podélné poloze nakrátko

## 5.5 Tabulky

Následující tabulky 5.5.1-6 popisují získané hodnoty během měření v příčné a podélné poloze.

f [Hz]	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
$u_q$ [mV]	762,00	787,00	802,00	799,00	801,00	805,00	801,00	804,00	804,00	782,00	777,00	802,00
$i_q$ [mA]	155,00	108,00	67,60	57,60	51,00	39,40	35,50	31,60	28,30	25,80	23,30	22,40
$\varphi_a$ [ms]	6,20	5,80	4,00	3,00	2,64	2,08	1,76	1,48	1,36	1,08	1,00	0,80

Tab. 5.5.1 Naměřené hodnoty v příčné poloze, zesílení -25dB

f [Hz]	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
$u_q$ [mV]	1,28	1,32	1,34	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,32	1,37	1,37	1,35
$i_q$ [mA]	252,00	178,00	112,00	94,40	82,70	66,10	56,40	49,70	44,60	41,50	38,90	35,40
$\varphi_a$ [ms]	7,20	6,20	3,90	3,20	2,64	2,12	1,68	1,48	1,28	1,10	0,98	0,87

Tab. 5.5.2 Naměřené hodnoty v příčné poloze, zesílení -20dB

f [Hz]	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
$u_q$ [mV]	2,05	2,09	2,12	2,15	2,12	2,12	2,12	2,08	2,09	2,14	2,15	2,15
$i_q$ [mA]	384,00	272,00	169,00	144,00	126,00	103,00	87,10	74,30	66,70	62,90	58,40	53,40
$\varphi_a$ [ms]	7,60	6,60	4,00	3,24	2,96	2,24	1,76	1,56	1,32	1,14	1,00	0,89

Tab. 5.5.3 Naměřené hodnoty v příčné poloze, zesílení -15dB

<b>f [Hz]</b>	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	10
<b>u<sub>q</sub> [mV]</b>	9,35	9,59	9,95	9,47	10,10	9,95	10,10	9,71	9,54	10,20	9,92	10,10	9,04
<b>i<sub>q</sub> [mA]</b>	1,58	1,09	0,67	0,58	0,50	0,40	0,35	0,30	0,27	0,26	0,22	0,22	1,57
<b>φ<sub>a</sub> [ms]</b>	8,60	6,80	4,10	2,80	2,80	2,16	1,74	1,44	1,30	1,10	0,94	0,88	8,30

Tab. 5.5.4 Naměřené hodnoty v příčné poloze, zesílení -3dB

<b>f [Hz]</b>	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	10
<b>u<sub>d</sub> [V]</b>	8,99	9,97	10,10	9,87	10,10	10,20	10,10	10,20	9,89	9,59	10,10	10,00	9,44
<b>i<sub>d</sub> [A]</b>	3,23	2,84	2,23	1,46	1,29	1,02	0,83	0,72	0,61	0,52	0,50	0,45	3,31
<b>φ<sub>a</sub> [ms]</b>	0,40	4,40	4,40	3,40	2,90	2,44	1,92	1,56	1,40	1,24	1,14	1,00	0,40
<b>i<sub>fd</sub> [mA]</b>	600,00	537,00	420,00	273,00	240,00	188,00	149,00	127,00	107,00	90,30	86,50	77,10	632,00
<b>φ<sub>i</sub> [ms]</b>	49,20	23,40	16,60	10,10	8,50	6,40	5,20	4,32	3,72	3,18	2,86	2,60	53,60

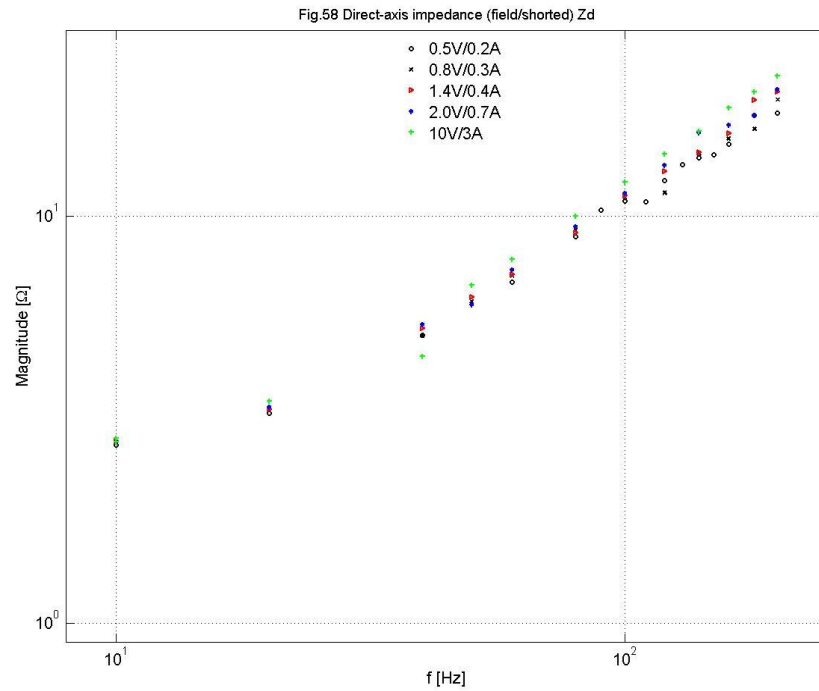
Tab. 5.5.5 Naměřené hodnoty v podélné poloze nakrátko, zesílení -3dB

<b>f [Hz]</b>	10	20	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	10
<b>u<sub>d</sub> [V]</b>	9,68	9,81	9,82	10,20	10,10	9,60	10,10	10,20	10,20	10,30	10,10	9,81	9,65
<b>i<sub>d</sub> [A]</b>	1,56	1,28	0,94	0,87	0,78	0,64	0,59	0,52	0,47	0,43	0,41	0,36	1,54
<b>φ<sub>a</sub> [ms]</b>	3,00	4,20	2,88	2,44	2,12	1,82	1,54	1,34	1,18	1,07	0,97	0,86	3,20
<b>u<sub>fd</sub> [V]</b>	28,90	28,90	26,30	26,10	24,50	20,80	20,60	19,20	18,10	17,30	16,50	15,00	28,60
<b>φ<sub>U</sub> [ms]</b>	1,12	0,90	0,84	0,84	0,80	0,76	0,60	0,58	0,55	0,47	0,43	0,40	0,76

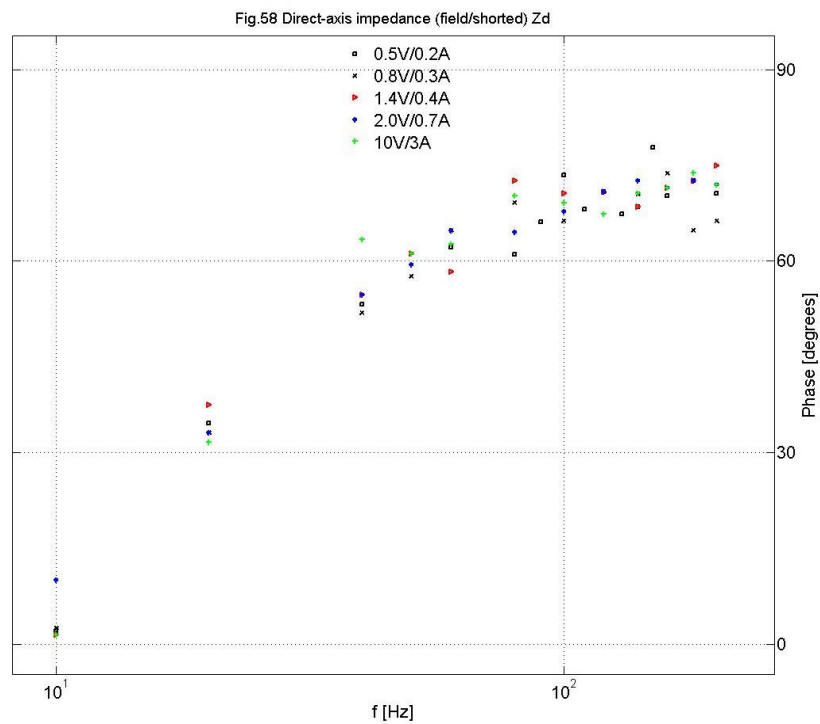
Tab. 5.5.6 Naměřené hodnoty v podélné poloze naprázdno, zesílení -3dB

## 5.6 Grafy

Grafy na obrázcích 5.6.1-8 ukazují průběh veličin vypočítaných z naměřených dat. Grafy na obrázcích 5.6.9-12 ukazují předpokládané průběhy vypočítaných veličin.

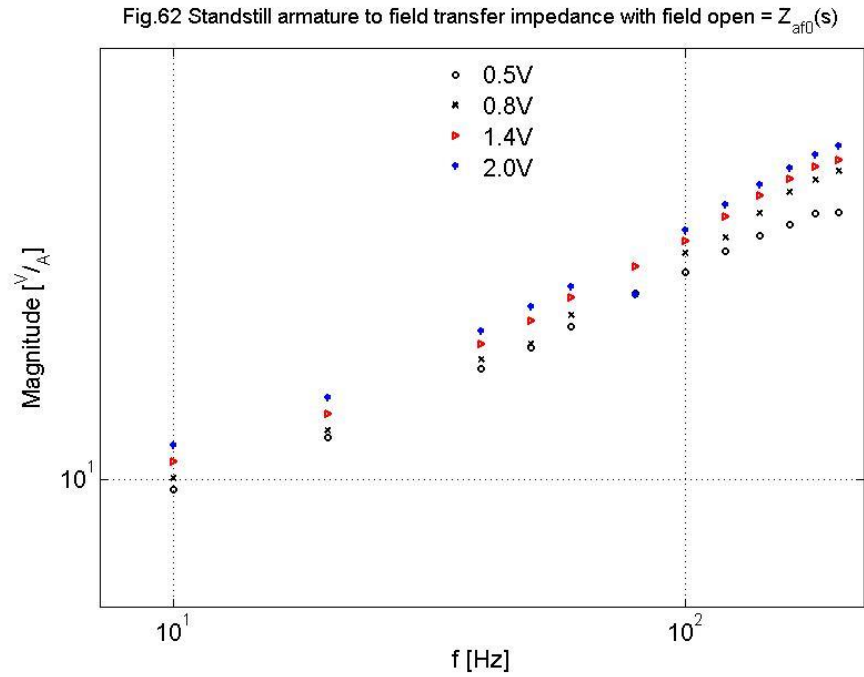


Obr. 5.6.1 Průběh velikosti operátorové podélné impedance, zapojení nakrátko v podélné poloze

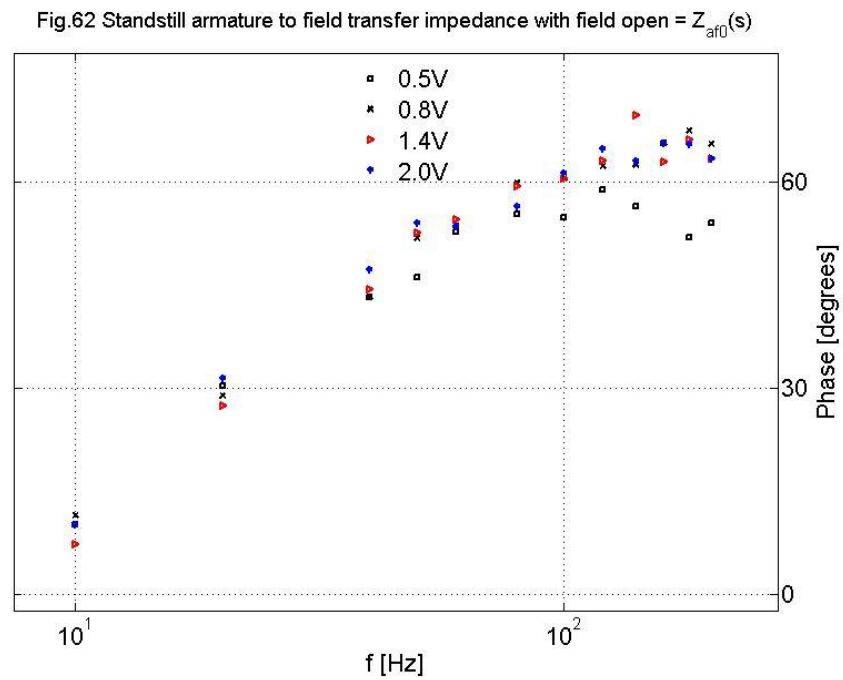


Obr. 5.6.2 Průběh fáze operátorové podélné impedance, zapojení nakrátko v podélné poloze

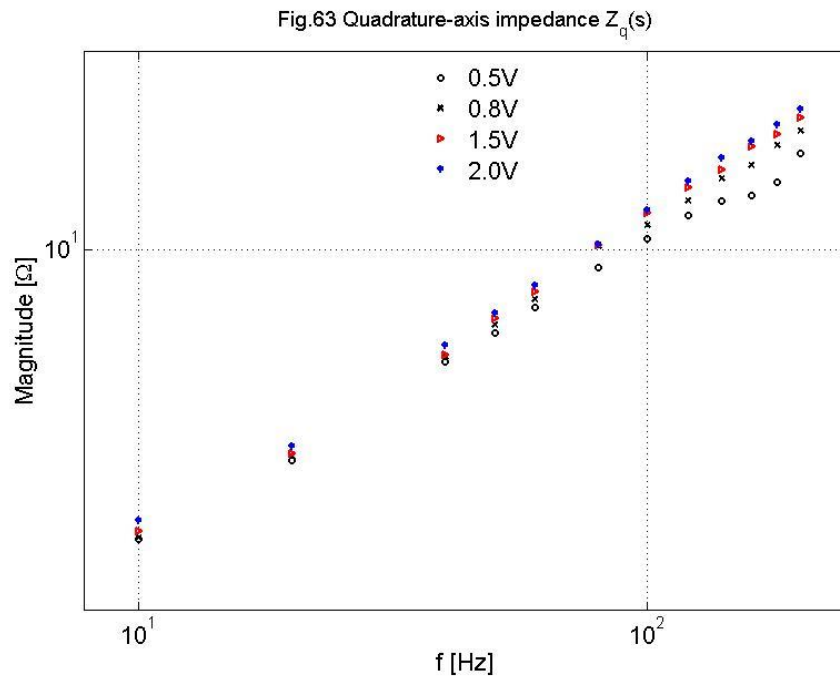




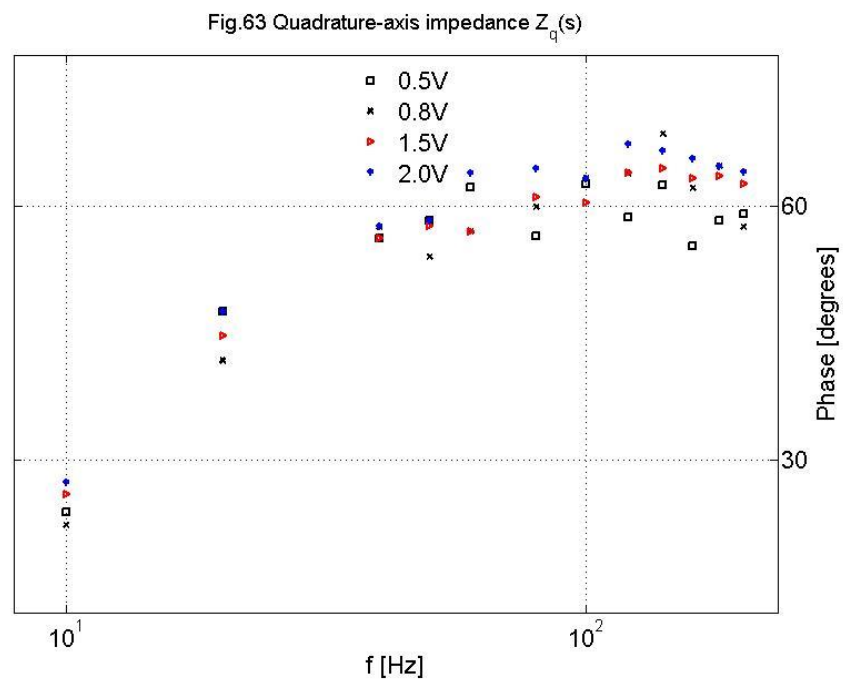
Obr. 5.6.3 Průběh velikosti poměru Laplaceovy transformace budícího napětí a proudu, zapojení naprázdno v podélné poloze



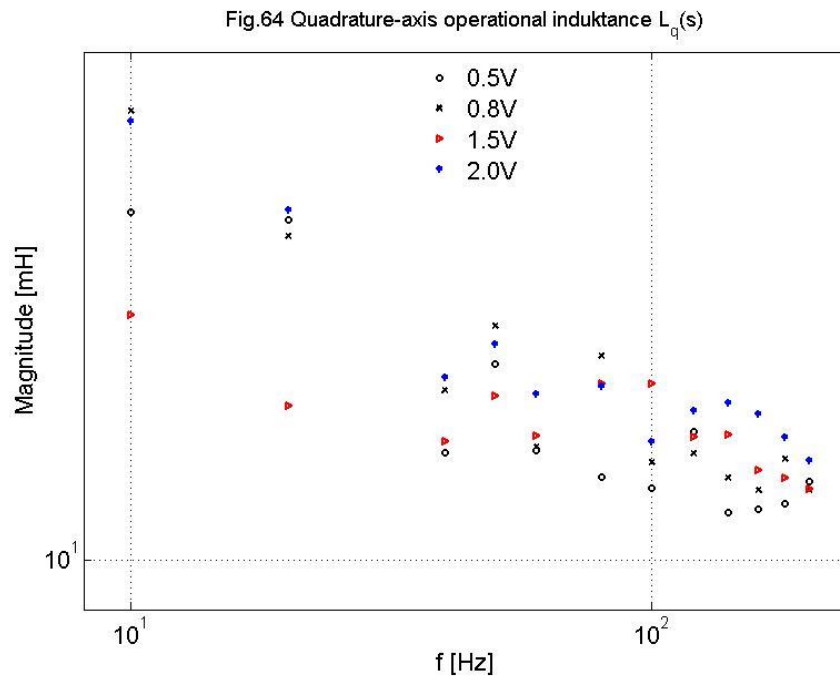
Obr. 5.6.4 Průběh fáze poměru Laplaceovy transformace budícího napětí a proudu, zapojení naprázdno v podélné poloze



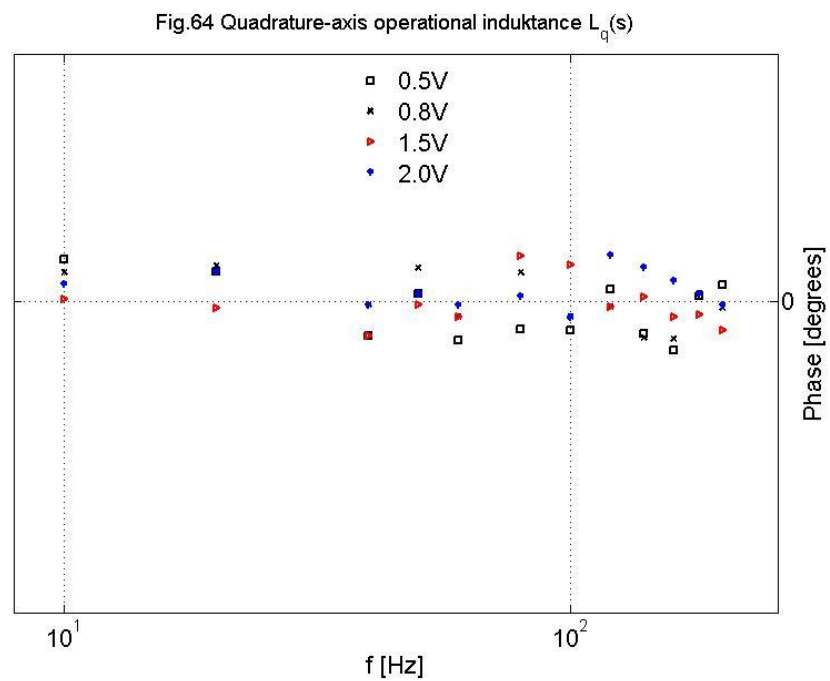
Obr. 5.6.5 Průběh velikosti operátorové příčné impedance, příčná poloha



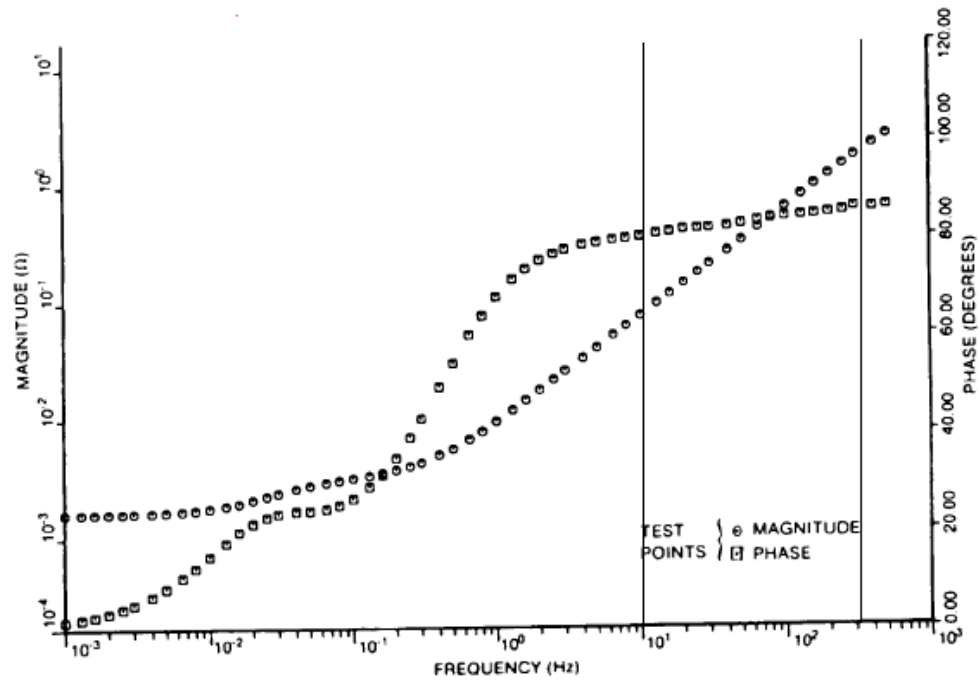
Obr. 5.6.6 Průběh fáze operátorové příčné impedance, příčná poloha



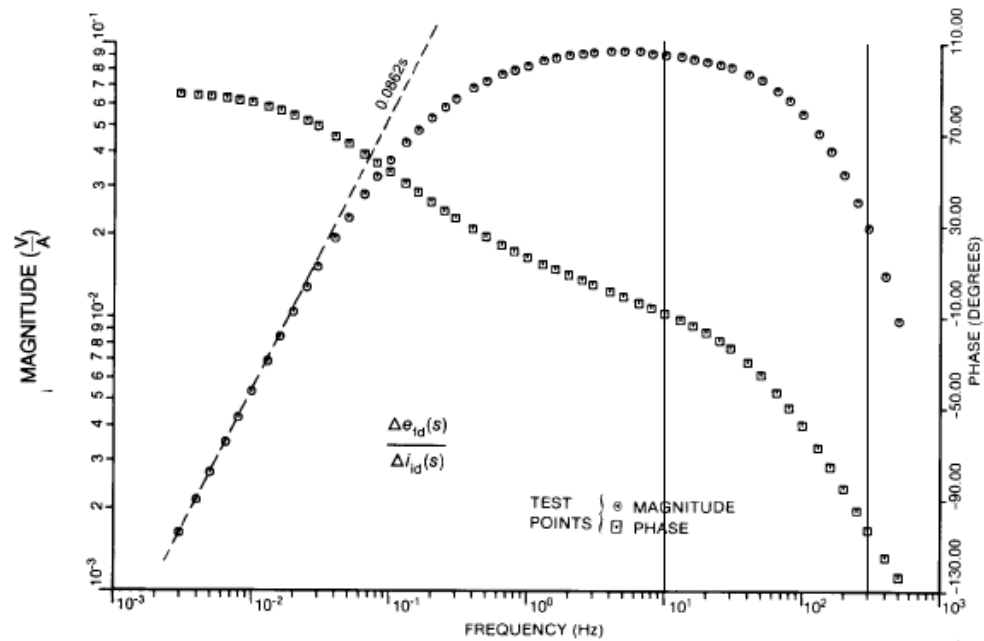
Obr. 5.6.7 Průběh velikosti operátorové příčné indukčnosti, příčná poloha



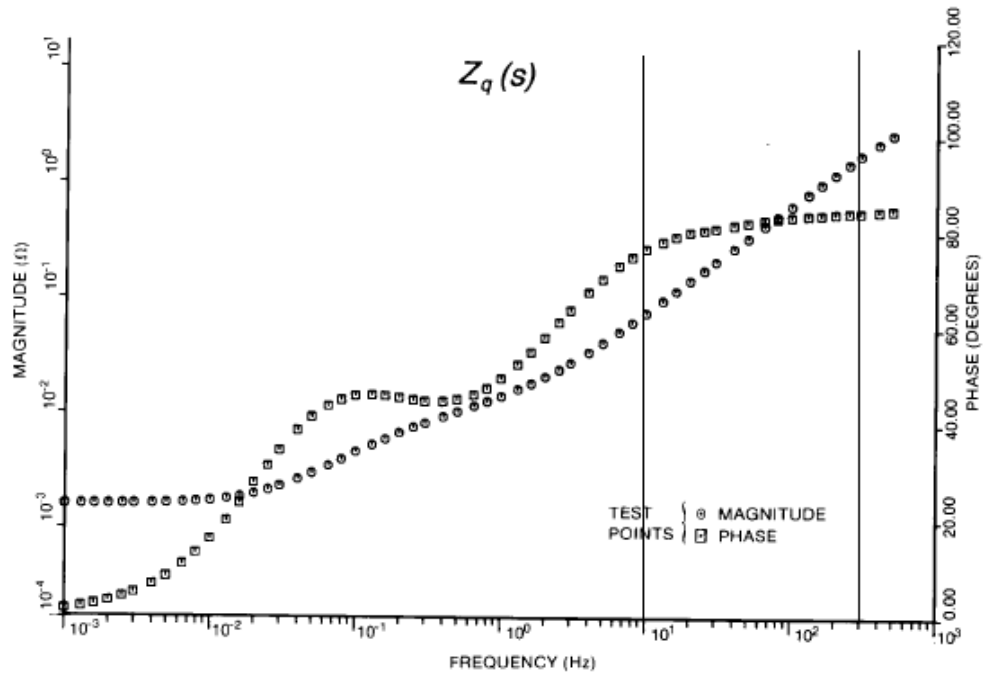
Obr. 5.6.8 Průběh fáze operátorové příčné indukčnosti, příčná poloha



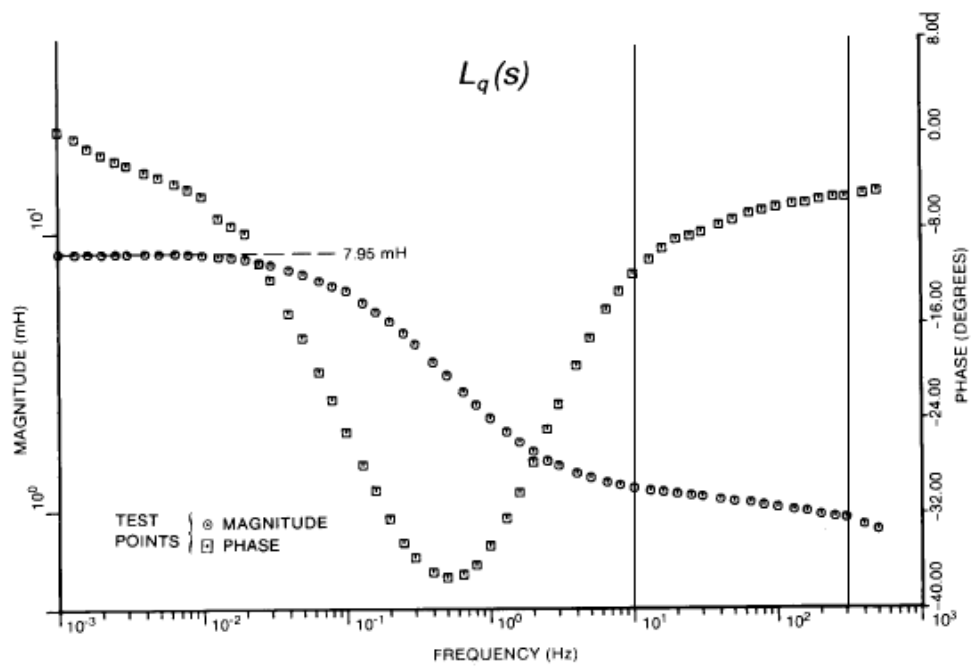
Obr. 5.6.9 Průběh velikosti a fáze operátorové podélné impedance, zapojení nakrátko v podélné poloze [1]



Obr. 5.6.10 Průběh velikosti a fáze poměru Laplaceovy transformace budícího napětí a proudu, zapojení naprázdno v podélné poloze [1]



Obr. 5.6.11 Průběh velikosti a fáze operátorové příčné impedance, příčná poloha [1]



Obr. 5.6.12 Průběh velikosti a fáze operátorové příčné indukčnosti, příčná poloha [1]

## 5.7 Použité přístroje

Následující tabulky 5.7.1-3 popisují štítkové údaje měřeného stroje a použitých přístrojů. Obrázky 5.7.1-4 ukazují měřený stroj a přístroje použité při měření.

<b>Alternátor</b>	
Typ	A8B6 003
Napětí stator [V]	400/231
Proud stator [A]	14,5
Frekvence [Hz]	50
Výkon [kW]	8
cosφ	0,8
Napětí rotor [V]	16-49
Proud rotor [A]	3,57-8,34
Sériové číslo	538739

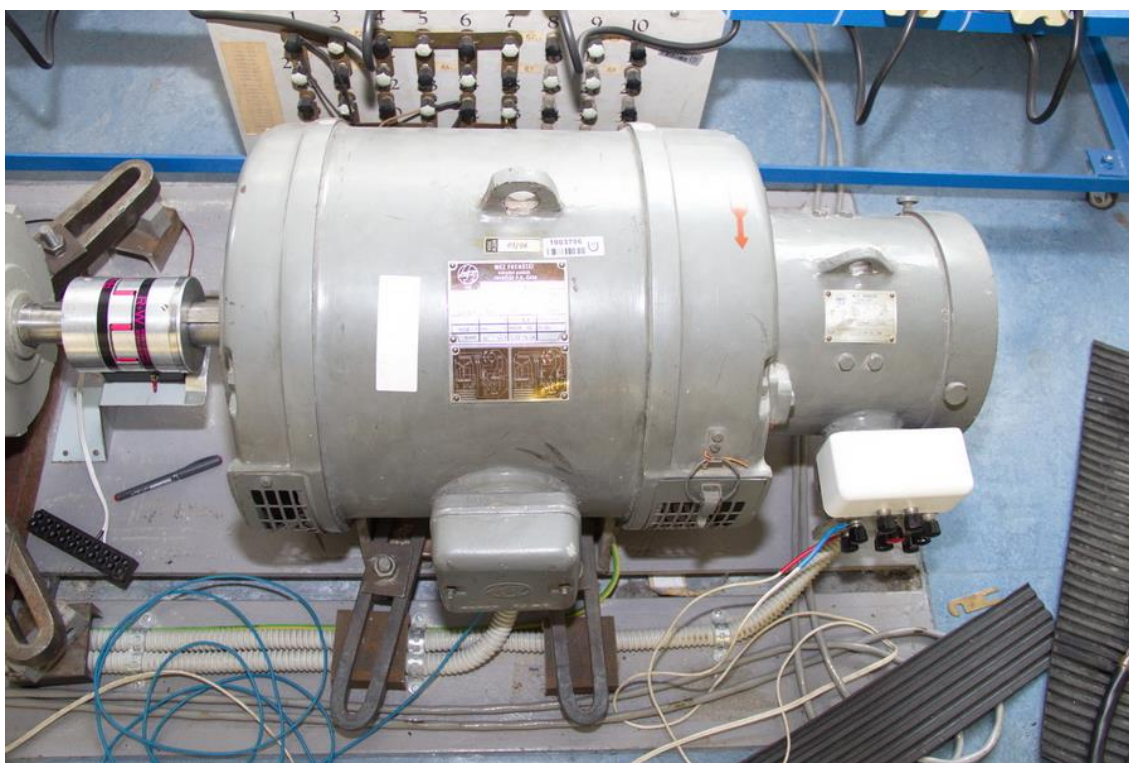
Tab. 5.7.1 Štítkové údaje alternátoru

<b>Budič</b>	
Typ	D131714 092
Napětí [V]	55
Proud [A]	9,1
Příkon [kW]	0,5
Sériové číslo	538739

Tab. 5.7.2 Štítkové údaje budiče

<b>Název</b>	<b>Výrobce</b>	<b>Typ</b>
Generátor signálu	Metex	MS-9140
Výkonový zesilovač	Yamaha	P7000S
Osciloskop	Tektronix	TDS2024B
Proudová sonda	Tektronix	A622
Proudová sonda	Tektronix	A623

Tab. 5.7.3 Použité přístroje pro měření



Obr. 5.7.1 Měřený synchronní stroj

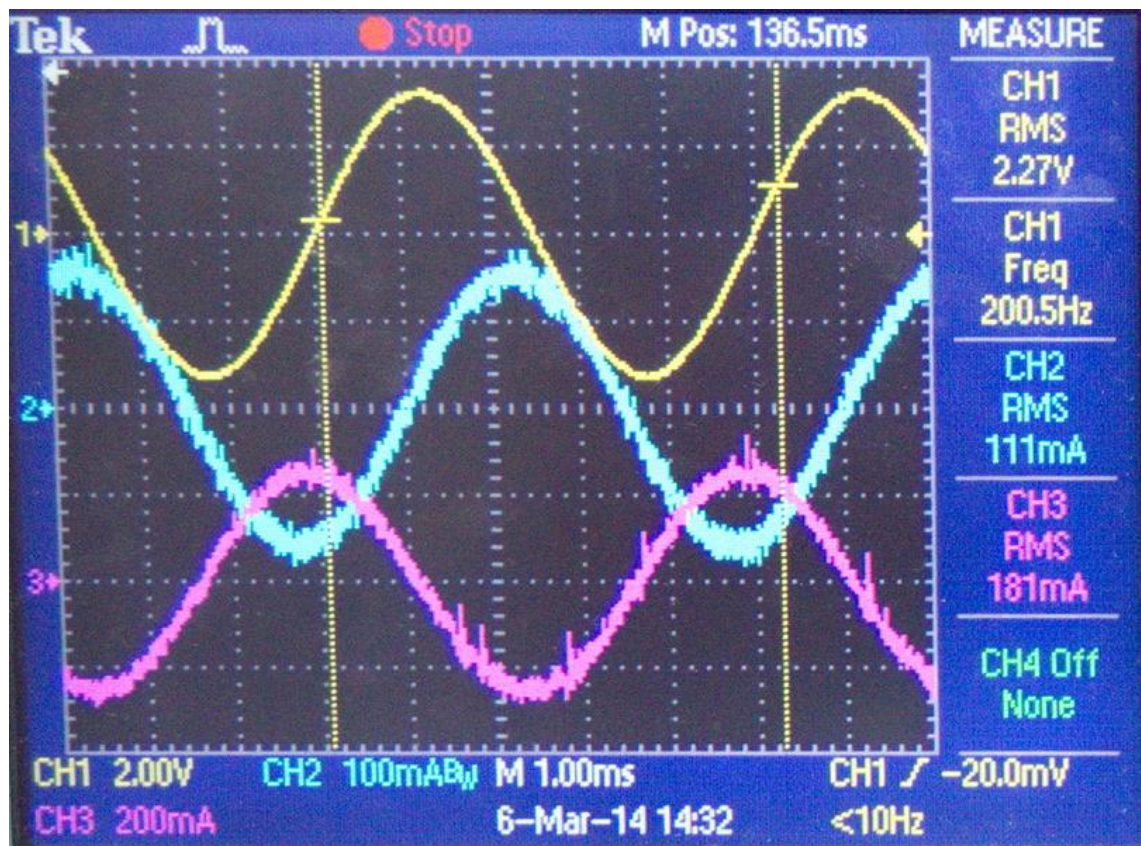


Obr. 5.7.2 Měřicí zařízení





Obr. 5.7.3 Výstupní hřídel stroje s nastavením příčné a podélné polohy



Obr. 5.7.4 Měřené průběhy signálů



## Závěr

Princip a obecné vlastnosti synchronního stroje jsou popsány v kapitole 1. Je zde obecně popsána konstrukce stroje a jeho princip.

Princip metody je popsán v kapitole 2. Jsou zde také uvedeny výhody této metody, mezi něž patří například možnost měření stroje zabudovaného v soustrojí a bezpečnost celkové zkoušky. Výpočet základních parametrů je uvedený vztahem (2.1.1-6).

V kapitole 3 jsou uvedeny základní požadavky na přípravu stroje pro měření zkouškou za klidu. Také je zde uvedeno nastavení stroje do příčné či podélné polohy obr. 3.3.1 a zapojení vinutí stroje pro nastavení polohy rotoru obr. 3.3.2.

Požadavky na měřicí zařízení se zabývá kapitola 4, kde jsou uvedeny důležité parametry, které musí splňovat použité přístroje pro měření. Jedním z důležitých parametrů je analýza signálu o velmi nízkých kmitočtech, až  $0,001\text{Hz}$ .

Kapitola 5 se zabývá stanovením postupu pro měření a provedením měření. V odstavcích 5.1 až 5.4 je popsáno, jakým způsobem byl stroj připraven na měření. Odstavce 5.5-7 popisují data získaná během měření a použité přístroje. Měření proběhlo v příčné a podélné poloze. Frekvence byly nastavovány v rozsahu od  $10\text{Hz}$  do  $200\text{Hz}$ . Nižší kmitočty neumožňoval rozsah generátoru. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 5.5.1 až 5.5.6, pro různé hodnoty zesílení výkonového zesilovače. Ze získaných dat byly pomocí výpočtového softwaru MATLAB vytvořeny grafy popisující důležité parametry stroje (obr. 5.6.1-8). Průběhy veličin  $Z_d$ ,  $Z_q$ ,  $L_q$  odpovídají předpokládaným průběhům na obr. 5.6.9, 5.6.11 a 5.6.12. Průběh  $Z_{af0}$  obr. 5.6.3 a 5.6.4 neodpovídá předpokládanému průběhu obr. 5.6.10. Důvodem je větší pokles proudu statoru  $i_d$  oproti poklesu napětí rotoru  $u_{fd}$ .

Měření proběhlo bez potíží, ale bylo časově náročné. Synchronní stroj a použité vybavení pro měření je ukázané na obrázku 5.7.1 a 5.7.2. Pro urychlení nastavení příčné a podélné polohy byly na výstupní hřídel stroje vytvořeny značky pro přibližné nastavení polohy hřídele obr. 5.7.3. Průběhy měřených veličin jsou ukázány na obr. 5.7.4.

Později bylo měření opakováno s generátorem, který umožňoval generovat signál o nejnižší frekvenci  $0,01\text{Hz}$ . Při měření nízkých kmitočtů nastal problém s analýzou signálu z rotoru. Důvodem je velmi malé napětí, případně proud, který se indukuje do rotorového vinutí.

## **Seznam literatury a informačních zdrojů**

[1] IEEE Guide test Procedure for Synchronous Machines, IEEE Std. 115-2009, May, 2010